中華農業研究（Jour. Agric. Res. China）47(1)：71～94（1998）

氣流屏蔽式施藥系統之設計評估[1]

蔡致榮[2]　H. Erdal Ozkan[3]

摘要：噴霧飄移乃農藥使用者與施藥地區民衆關心噴藥作業之焦點，而噴霧屏蔽之使用已成爲減低噴霧飄移推薦策略中之一項技術，儘管許多研究已顯示機械式屏蔽對噴霧飄移之減低有正面效果，然而仍少有氣流屏蔽使用之資料，本研究中使用電腦流體動力模擬軟體 FLUENT，基於比較飄移減低效果而進行氣流屏蔽式噴藥系統之設計評估，爲便於相對比較，使用噴頭之傳統噴霧、氣輔噴霧與擬氣流剪切噴霧也包括於此模擬研究中。本研究所得之主要結論如后，並非所有氣流屏蔽之模擬情形皆可提供良好之飄移控制，爲確保較佳之飄移減低效果並減少氣流屏蔽所需之功率需求，主要變數之最適操作參數經多因子變方分析選定爲氣流速度40m/s、單位長度氣流流量1.7m³/s/m 以及氣流角度15度，其與某些有關氣輔噴霧與氣流剪切噴霧之前人研究結果相當吻合。除了氣輔噴霧與擬氣流剪切噴霧外，具氣流速度大於40m/s、單位長度氣流流量大於1.7m³/s/m，以及氣流角度爲15度之氣流屏蔽噴霧頗有希望成爲減低噴霧飄移之另類技術。

關鍵詞：氣流屏蔽、施藥系統、設計評估、CFD、FLUENT。

前　　言

隨著環保意識之高漲，社會大衆對農藥使用日趨重視，消費者甚至熱中於購買標榜無農藥殘毒之有機農產品。然而，爲達合理之經濟回收，農民將繼續使用農藥。雖然近來作物育種與基因工程迭有精進，改善農作物對昆蟲與疾病之抵抗或許可減低農民對農藥之依賴，但是在某些場合，例如抑制特定疾病、昆蟲或雜草非預期族群之迅速增加，農藥施用仍將扮演重要角色。儘管其他控制害蟲、疾病與雜草之替代方法將繼續被加以研發，農藥施用仍將是病蟲害防治之最有效工具，但是爲迎合大衆輿論並兼顧環境與農產業之折衷利益，農藥施用必須被視爲一項有價值之策略且只於需要時才被使用，如此才能減少農藥施用之次數與數量。

噴霧飄移（spray drift）乃農藥施用上最受注意之問題，其爲農產業所不欲見，除牽涉相關作業人員安全與健康之嚴重風險外，且有害於自然環境。當部份施噴農藥離開預定目標區而沉積於作物附近時，噴霧飄移於焉發生。儘管飄移可能以蒸氣之形式於噴霧作業完成很久後仍產生，大部份之噴霧飄移源來自小霧粒之實際運動而遠離預定目標區，其不儘增加農藥之浪費而且可能污染環境。儘管大氣狀況，例如風與相對濕度，遠非達成施噴時精準標定所需，而農藥施噴者仍選擇繼續施噴時，噴霧飄移之風險通常因之增加，縱然以增加施噴前進速度、減低施噴率與使用較寬噴桿之噴藥作業可能延長適合噴藥之時段，然而這些策略卻也可能提高噴霧飄移之風險，因此，尋求減低噴霧飄移損失之方法相當重要。

---

1. 臺灣省農業試驗所　研究報告 1931 號。
2. 本所農業工程系副研究員。臺灣省　臺中縣　霧峰鄉。
3. 美國俄亥俄州立大學食品、農業與生物工程系教授。美國　俄亥俄州。

農民與農藥施噴者對減低噴霧飄移之實際應用深感興趣，而最常被提及之技術包括使用減低飄移之噴頭（drift reduction nozzles）、阻抗飄移之農藥（drift retardant chemicals）、氣輔噴霧（air-assisted spraying）、靜電噴霧（electrostatic spraying）以及屏蔽式噴桿（shielded spray booms）。本文旨在以電腦軟體模擬評估氣流屏蔽式噴藥系統之設計參數，並與氣輔噴霧、氣流剪切噴霧（air-shear spraying）相比較，其相關之前人研究回顧評論如后。

文獻探討

一、氣流屏蔽式噴霧

使用保護性屏蔽以降低噴霧飄移係由 Edwards 氏與 Ripper 氏[5]於1953年首先提出，他們的"Nodif"噴桿和無屏蔽噴霧機相較可減低飄移達42至幾乎100%，其差異視噴頭尺寸，操作壓力以及風速而異。之後四十餘年，陸陸續續許多研究[6,8,9,14,20,21,28,29]被進行以評估屏蔽噴霧之有效性，其結果顯示屏蔽對噴霧飄移之減低有正面效果，然而各個研究間彼此有相當大之差異，而且大部份之研究主要在於機械式屏蔽之探討，其中唯有 Smith 氏等人[29]對氣流式屏蔽略有研究，然而其結果指出氣流截面寬度爲2.5cm 與氣流出口風速爲7.1m/s之氣流屏蔽僅於風速小於2m/s 時才有效。不可諱言，氣流屏蔽式噴霧因此一早期且不利之研究而未有完全之檢視與評估，反觀目前氣輔噴霧之商品機使用氣流之速度高達20—67m/s，顯然同樣是氣流運用之氣流屏蔽式噴霧不應侷限於以往有限之試驗結果而受忽略。令人鼓舞的是 Brown 氏[1]於開發森林用氣輔噴霧機時，同時也顯示氣流屏蔽式噴霧之優點（詳見氣流剪切噴霧部份之回顧評論）。因此，更進一步深入研究氣流屏蔽式噴霧實有迫切之需要。

二、氣輔噴霧之廣義概念

氣輔噴霧並非新概念，但是最近又被重新考慮，根據 Hislop 氏[11]所言，第一部氣輔噴霧機可能於1885年在法國被開發出來供葡萄園噴藥作業使用。概念上而言，氣輔噴霧系統乃特殊設計之噴霧機，其可供應氣流以攜帶並分散由霧化器所形成之霧粒。目前，商用之氣輔噴霧系統可依霧粒導入氣流方式之不同而分成兩類。第一類像 Hardi Twin System，霧化器係在氣流外面，但以特定角度指向氣流中，從霧化器壓射出來的霧粒係在作物叢上方特定位置與氣流交接，此種方式氣流與霧化器可獨立加以調節而得不同之操作組合。第二類像 Spray-Air 氣流剪切噴霧系統，霧化器係承裝於氣流中，由於此種霧化受氣流速度變化影響頗大，因此，爲獲得所需之霧粒大小氣流速度之設定相當重要。爲區分此兩種氣流輔助系統，本研究中稱第一類爲狹義氣輔噴霧，而第二類爲氣流剪切噴霧。

基本上而言，氣輔噴霧之主要功能由霧化單元與氣流供應單元兩種組件完成。就像傳統噴霧機，此種系統之霧化單元可製造充份且必需之壓力以供施噴農藥之霧化與形成霧粒；氣流供應單元由軸流風扇、氣囊與其他承接組件組成，係設計以產生均勻且穩定之氣流。當霧粒撞上向下流動之氣流，所需之噴霧樣式（spray pattern）於是於噴桿下方形成，氣流隨後捕捉並遞送霧粒至作物叢中。

另一方面，例如 Spray-Air 氣流剪切噴霧系統乃由152mm 鍍鋅鋼管與運送氣流供 Shear Guard Plus 噴頭使用之玻璃纖維管組成。Shear Guard Plus 噴頭乃氣流鼓風型（a plain jet airblast type），其具有兩個由共同之玻璃纖維岐管供應之整型氣流（shaping jets）。施噴之液體被導入氣流之中心，當它碰上高速之氣流時於是被加以霧化，隨後兩股橫越之氣流於是整修已遭霧化之霧粒而形成平扇形樣式（flat-fan pattern）。此種噴霧系統霧化器出口係沿噴桿每隔203mm 而且指向前方17度而裝設，由於氣流之高動量與霧化器之前傾裝設產生可打開作物叢之紊流，因此此種系統可攜帶霧粒進入葉片叢中而改善霧粒之穿透與附著效果。

(一)狹義之氣輔噴霧

氣輔噴霧之霧粒由於係由氣流捕捉與運送並不受風之影響。因此，氣輔噴霧系統可大量地

減低噴霧飄移。Quanquin[26]評估並決定 Hardi Twin System 氣輔噴霧機之性能、飄移減低能力以及田間效能，結果顯示氣流輔助減低噴霧飄移達50～90%，而且增加在棉花、蕃茄與甜菜雜草控制上之霧粒附著。

Taylor 與 Andersen 氏[30]評估氣流輔助使用於田間作物噴霧機以減低飄移，結果顯示使用平扇形噴頭於 Hardi Twin System 並傾斜氣幕向前可降低飄移達60%。當使用氣流輔助時，施藥率100 l/ha 之小霧粒飄移相當於施藥率200 l/ha 之傳統大霧粒飄移。風速於8.5m/s 下使用氣流輔助之噴霧飄移量相當於風速小於4.5m/s 而無氣流輔助之飄移量。當無氣流輔助時，增加噴藥前進速度噴霧飄移因之增加，但當有氣流輔助時就特定噴頭而言，噴霧飄移被維持於幾近固定之數量。

Young 氏[37]使用 Hardi Twin System 以氣流直接向下具30m/s 之吹出速度（emission velocity）進行研究氣流輔助之功效，他指出體積平均粒徑（Volume Mean Diameter，VMD ）介於200至500μm 之液壓霧粒於逆風達2m/s 情形下，此種氣流輔助有利於減低噴霧飄移，然而 Hardi Twin System 氣幕的功效隨著霧粒大小之增加而減低。

對於氣流輔助在不同風速下類似之飄移減低功效 Quanquin 氏[27]也有報告，他指出氣流輔助於8.5m/s 風速下產生之噴霧飄移量並不多於傳統噴霧於1.5m/s 風速下產生之噴霧飄移量。Howard 與 Mulrooney 氏[16]討論遠離目標區之飄移，並指出在空地（bare ground）情況下氣輔噴霧機相較於傳統行列噴霧機（row sprayer）有較高之飄移可能性，尤其當較低施藥率與較高氣流速度被使用時爲最。

Watson 與 Wolff 氏[33]報導說對於玉米與大豆而言，遮罩（shroud）內氣流運送（air carrier method）之噴霧方法改善了對整體植物之附著與附著均勻性（deposition uniformity），尤其對於作物頂部（upper-plant）與葉背表面之附著顯著增加。相同地，Manor 氏等人[18]使用氣輔噴霧機達到了對於棉花叢底部之較佳穿透效果、較多噴霧於葉背表面，以及顯然比葉背較佳之噴霧附著於葉表。對於氣輔噴霧增加噴霧附著效率之正面效果，Womac 氏等人[35]以及 Howard 氏等人[15]也有類似報告。

Derksen 氏[4]強調很少有關氣輔噴霧機性能之研究牽涉生物性效能（biological efficacy），他指出低施藥率之氣輔施噴技巧相較於傳統高施藥率散噴作業（broadcast sprayer applications）可減少鮮食甘藍菜之農藥使用。在另一類似的試驗中，Grinstein 氏等人[10]指出在種球洋葱花梗上葉斑疾病（leaf spot disease）之嚴重性可被氣輔噴霧減低大約75%，其相較於傳統噴霧之大約減低30%，可謂效果卓著。

儘管大部份之試驗顯示氣輔噴霧可減低噴霧飄移，但是某些研究也有不同的結果。Cooke 氏[3]比較使用液壓噴頭之噴霧機與 Degania 氣輔噴霧機於田間作物之噴霧飄移，儘管有較佳之霧粒分佈均勻度與相當之霧粒附著，氣輔噴霧機通常比液壓噴霧機產生較多之飄移，他們的結論爲除非像氣流速度與於目標作物上方噴霧釋放高度等之操作參數被加以最適化，否則噴霧飄移可能因之加劇。Hislop 氏等人[12]也報告氣流輔助實質地減低於風洞中風速爲4m/s 之噴霧飄移，但是於風速爲 1 與2m/s 下與行進方向成前向或後向45度之氣流輔助卻顯著地增加少量之噴霧飄移。

爲善用氣輔噴霧之正面優點，某些研究人員也研究氣流之最適化設定，Panneton 氏等人[22]基於某氣輔噴霧之研究而分離氣流速度、單位長度氣流流量與氣流方向對葉面附著之影響，其中各獨自變數之範圍如下：氣流速度， 0 至36m/s；單位長度氣流流量，0 至1.3m^3/s/m；而氣流角度，－10.2至40.2度。他們報告說氣流速度對葉面附著有最大之影響，而較高之氣流速度與單位長度氣流流量相對地增加葉面附著，該研究所提出之最佳噴霧狀況乃使用氣流速度高於25m/s，單位長度氣流流量大於0.9m^3/s/m。而基於提供花椰菜（broccoli）與馬鈴

薯葉所有葉背之保護所得最適化噴藥狀況平均爲：單位長度氣流流量0.94m³/s/m，氣流速度31m/s 以及氣流角度22度。因爲此最適化操作參數之數值係位於所觀測範圍之邊緣，他們建議未來之研究應擴大研究之範圍以決定所得之數值是否代表眞正之最佳點。

類似地，Ringel 與 Anderson 氏（引用 Pompe 與 Holterman 氏[23]之報告）使用 Hardi Twin System 噴霧機研究氣流噴射角度（往前20度、垂直以及往後30度）與氣流速度（0、16與28m/s）對飄移至空氣中與地面上以及霧粒沉積於多麥上之影響，他們發現當氣流在最高速度被以前向20度噴射時飄移至空氣中與地面上的量可最有效地減低，此與 Taylor 與 Andersen 氏[30]以及 May 氏[19]之研究結果「後向傾斜之氣輔噴桿導至比垂直氣輔噴桿較多之噴霧飄移」相吻合。

㈡氣流剪切噴霧

至於氣流剪切噴霧之性能，Campell 與 Thill 氏[2]使用氣流剪切噴霧機、傳統噴霧機以及氣流剪切加傳統噴霧機以比較野燕麥之控制，他們發現使用氣流剪切噴霧機時，野燕麥之有效控制與減低殺草劑量之能力係隨殺草劑而異，而相對於傳統噴霧機而言，氣流剪切噴霧機之使用並未增加噴霧飄移。

Brown 氏[1]開發氣輔桿式噴霧之原型機供森林作業使用，他以三種氣流組合（無氣流、氣流剪切向下噴霧以及前向60度之氣幕）於風洞中評估此原型機。「氣流剪切向下噴霧」意即氣流與噴頭都在直接往下之同一方向；「前向60度之氣幕」乃氣流在垂直方向被偏斜往前60度以形成一道屏蔽與前進方向夾30度角，而噴頭係直接往下安裝。結果顯示，當風向在與前進方向夾 0 與45度時，「前向60度之氣幕」減低遠離目標之噴霧飄移比「氣流剪切向下噴霧」來得多。然而，在與前進方向夾90度風向時，「氣流剪切向下噴霧」減低85%之飄移損失，而「前向60度之氣幕」實際上增加噴霧飄移達57%。在田間試驗中，噴霧穿透進入葉叢中的量也被評估，在植物叢的頂端與中間部份，「氣流剪切向下噴霧」與「前向60度之氣幕」兩者與「無氣流」組合並無顯著之差異，然而，在植物叢底端「前向60度之氣幕」顯著地比「無氣流」組合增加噴霧附著，而「氣流剪切向下噴霧」則介於兩者之間，此一研究清楚地彰顯氣流屏蔽之優點，其乃本研究中意欲探討之重要項目。

三、噴霧飄移之電腦模擬

由於電腦科技精進，目前噴霧霧粒運動之電腦流體動力(Computational Fluid Dynamics,CFD) 模擬相當進步，某些應用已顯現令人鼓舞之結果。Lee 與 Schwalb 氏[17]使用由相位都普勒（phase-doppler）粒徑分析儀所獲得小容量壓力漩渦式霧化器之非蒸發性噴霧之霧粒特性，以評估商品化兩相三維度之電腦流體動力模擬程式 FLUENT ®，結果顯示此模式預測霧粒軌跡、速度與體積通量（volume fluxes）相當良好，而對於隨引氣流速度（air entrainment velocities）之預測除了在噴霧中心線部份外也相當準確。

Reichard 氏等人[24]首次以試驗驗證 FLUENT 模擬風洞中噴霧飄移之準確性，他們發現由此軟體預測之飄移距離與由風洞試驗所獲得者相當吻合。更進一步決定各種變數對噴霧飄移距離之影響也由 Reichard 氏等人[25]推動，他們的研究指出霧粒飄移距離隨風速與噴霧高度之增加而增加，但是隨霧粒之初始大小與速度之增加而減少。相對於較大霧粒之飄移距離而言，相對濕度之變化對粒徑小於100 μ m 霧粒之飄移距離有較大之影響。尤其當相對濕度與風速範圍在20—80%與0.5—4m/s 時，所有向下具20m/s 初始速度且粒徑在50mm 以下之水霧粒，將完全蒸發或於沉降在釋放點下方0.5m 前飄移遠超過6m。Zhu 等人[38]擴大模擬參數之範圍以決定田間噴霧藥機之飄移距離使達200 m，其所檢視變數對噴霧飄移之影響幾乎與 Reichard 氏等人[25]所發現者相同，然而就其所有模擬狀況而言，粒徑在50mm 以下之霧粒除非在低溫與高相對濕度情形下，於沉降在釋放點下方0.5m前悉數完全蒸發。

使用基於二維度 Random-Walk 模式之電腦模擬，Hobson 氏等人[13]就承裝於噴桿之液壓噴頭，對不同範圍之氣象與作物狀況研究噴頭大小、角度以及操作壓力對噴霧飄移之影響，其結果指出霧粒大小之量測，尤其是粒徑小於100 μ m 之霧粒體積百分比，影響噴霧飄移相當地大。同時他們也示範了來自於作物上方0.5m 噴霧角80度噴頭之噴霧飄移，比於作物上方0.35m 噴霧角110度噴頭之噴霧飄移來得多，儘管噴霧角80度噴頭所產生之霧粒相對上較粗。尤其，在有利霧粒蒸發之氣候條件下噴霧飄移顯著增加。

Weiner 與 Parkin 氏[34]使用 FLUENT 以模擬來自車輛承載式微霧噴霧機之氣流，根據三維度模擬與試驗量測之比較，氣流之主要特性，例如氣流中心線之速度與水平速度剖面，相當地吻合，此外，他們也預測霧粒之散佈但是並未加以驗正。Walklate 氏等人[32]使用同樣軟體以研究氣輔噴霧機於不同作物結構下氣流與霧粒傳輸之特性，他們指出儘管是同大小之霧粒，但穿透進入植物中之程度可能因噴頭位置差異而大幅改變。尤其，當噴霧源位於主氣流前方時，霧粒會被迫向上移動而翻越噴桿。儘管孔隙介質（porous media）模式被併入以模擬作物叢間流（crop canopy flows）並製作對應之速度向量，然而其所發表作物叢內霧粒之運動軌跡並不具太高價値，因爲此種模擬中作物對噴霧霧粒之過濾作用並未被眞實地反應出來。

材料與方法

本研究中藉著比較氣流屏蔽對飄移減低之作用，FLUENT 被使用以評估氣流屏蔽之不同設計。此種基於 CFD 之研究途徑是必需的，因爲目前並無適當之風洞可用，儘管只是電腦模擬，它提供某些好處，第一，在必需製造實體機械之前實際氣流屏蔽之特性可被建立，第二，此種途徑可縮小未來新試驗之範圍，第三，相較於以往傳統試誤法（trial-and-error methodologies）而言，CFD 之使用令使用者更快速地評估氣流屏蔽之設計特性。

當氣流被設計成屏蔽以限制橫越風並保護噴霧以免飄移時，氣流之速度、流量、角度、高度、壓力以及初始紊流強度等對氣流屏蔽之性能扮演極重要之角色。然而，現有之資料卻極少可用以指定減低飄移所需之氣流速度與單位長度氣流流量。低速與低流量之氣流可能不足以導引小霧粒向下而減低飄移，相反地，高速與高流量之氣流可能造成植物葉片於氣流中顫動不已，其不僅減少噴霧附著之表面面積，而且導致霧粒被從地面或植物叢反射而來之氣流往上攜帶。

Van 與 Howell 氏[31]決定初始紊流強度對於氣幕式平氣流（plane air-curtain jets）發展之影響，他們發現氣幕初始區的長度與區內之渦流黏度（eddy viscosity）強烈地受氣流初始紊流強度影響，然而，在氣幕之主要區域渦流黏度並不太受氣流初始紊流強度之影響，意義非凡的是在主要區域內氣流中心線之速度衰減與初始紊流強度無關。他們也指出較大初始紊流強度將縮短氣幕之初始區域，而當初始紊流強度高達20%時，氣幕之初始區域將被完全消除。本研究中氣流屏蔽效果之評估，主要集中於氣流屏蔽有關速度、流量與角度最適設計之探討。

圖 1 顯示供氣流屏蔽設計評估之模擬領域，氣流屏蔽之氣流出口位於模擬風下風處 1 m 高度65 cm 處，而模擬之噴頭則位於氣流出口下方15 cm 處，模擬所用之噴頭資料係以由 Malvern 雷射粒徑分析儀所獲得 TeeJet XR8002 噴頭之霧粒特性，按 Rosin-Rammler 粒徑與霧粒質量分佈[7]加以配湊而得下述之公式：

$$M_d = e^{-\left(\frac{d}{179.5}\right)^{1.64}}$$

此處 M_d 代表所有霧粒粒徑大於某特定粒徑 d 之質量比率（以小數表示），而 d 代表霧粒粒徑（以μm 表示）。所配湊 Rosin-Rammler 粒徑與霧粒質量分佈與原始之量測數據被比較並顯示於圖 2 中，顯然地，此一配湊之粒徑分佈在較大與較小霧粒範圍並非十分理想，但足以代表 TeeJet XR8002 噴頭而於本模擬研究中作爲比較之標準。

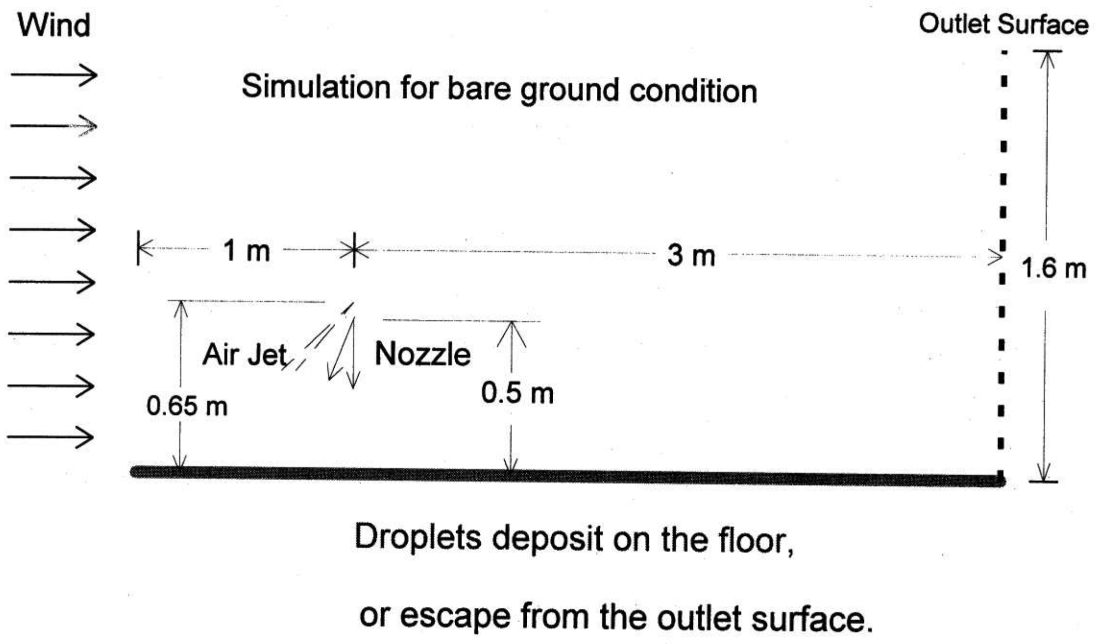

圖 1. 氣流屏蔽之模擬領域

Fig. 1. The simulation domain of pneumatic shields.

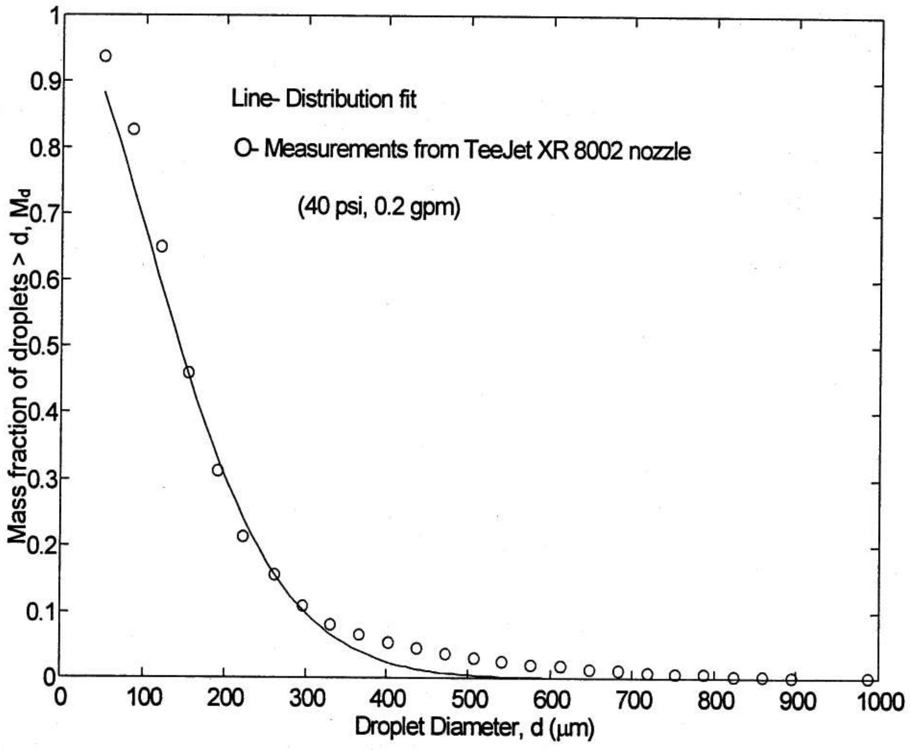

圖 2. TeeJet XR 8002 噴頭之 Rosin-Rammler 粒徑與霧粒質量分佈

Fig. 2. Rosin-Rammler size distribution fit for TeeJet XR 8002 nozzle.

爲聚焦於 TeeJet XR8002 噴頭所產生霧粒之主要粒徑範圍，本研究中所有模擬只考慮粒徑從50至600μm，而且爲模擬方便只有100個霧粒被釋放並加以分析，其粒徑分佈按下述之線性公式決定之。

$$d_I = d_{min} + \frac{d_{max} - d_{min}}{N-1}(I-1)$$

此處 d_I 代表第 I 個霧粒之粒徑（μm），d_{min} 乃最小之霧粒粒徑（50μm），d_{max} 乃最大之霧粒粒徑（600μm），N 代表模擬之總霧粒數（100），I 表示每一霧粒用之指數，從 1 至 N 。模擬所釋放之100個霧粒抑沈積附著於地上或從位於噴頭下風 3 m 處之出口而逃逸出模擬區域，本研究按 Young 氏[36]之定義稱此逃出模擬區域之部份霧粒爲飄移潛勢（drift potential）。

本模擬研究中所使用氣流屏蔽之組合顯示於圖 3 中，爲便於相對比較，使用噴頭之傳統噴霧、氣輔噴霧與擬氣流剪切噴霧也包括於此模擬研究中，所進行之模擬組合與對應之模擬參數也一併顯示於圖 3 中。

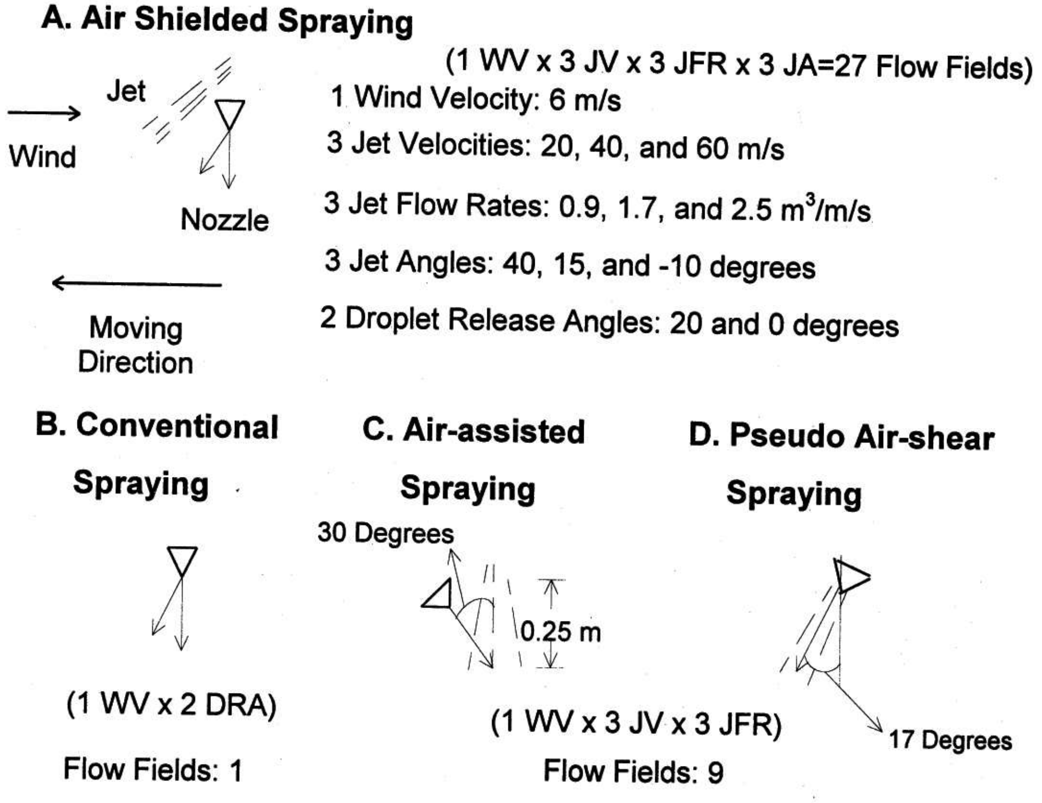

圖 3. 模擬所選用之氣流屏蔽與相關參數

Fig. 3. Selected pneumatic shields and other parameters used in simulations.

結果與討論

一、氣流屏蔽噴霧

圖 4 顯示由所有氣流屏蔽之模擬情況所獲得之相對飄移潛勢（relative drift potential），其係比較每個情況之飄移潛勢與霧粒釋放角 0 度下傳統噴霧之飄移潛勢而得，爲同時顯示各相對飄移潛勢對應之氣流角度，各圖點被以 1、2 或 3 加以碼化，其分別代表氣流屏蔽具40、15與－10度之氣流角

度。在54個模擬情況中有 4 個氣流屏蔽之情況增加飄移潛勢，其原因或爲太低單位長度氣流流量、太大霧粒釋放角、以及太大氣流參數組合，因此，並非所有氣流屏蔽之模擬情況皆可提供良好之飄移控制，如欲善用氣流屏蔽噴霧，最適操作參數必須仔細加以選擇。

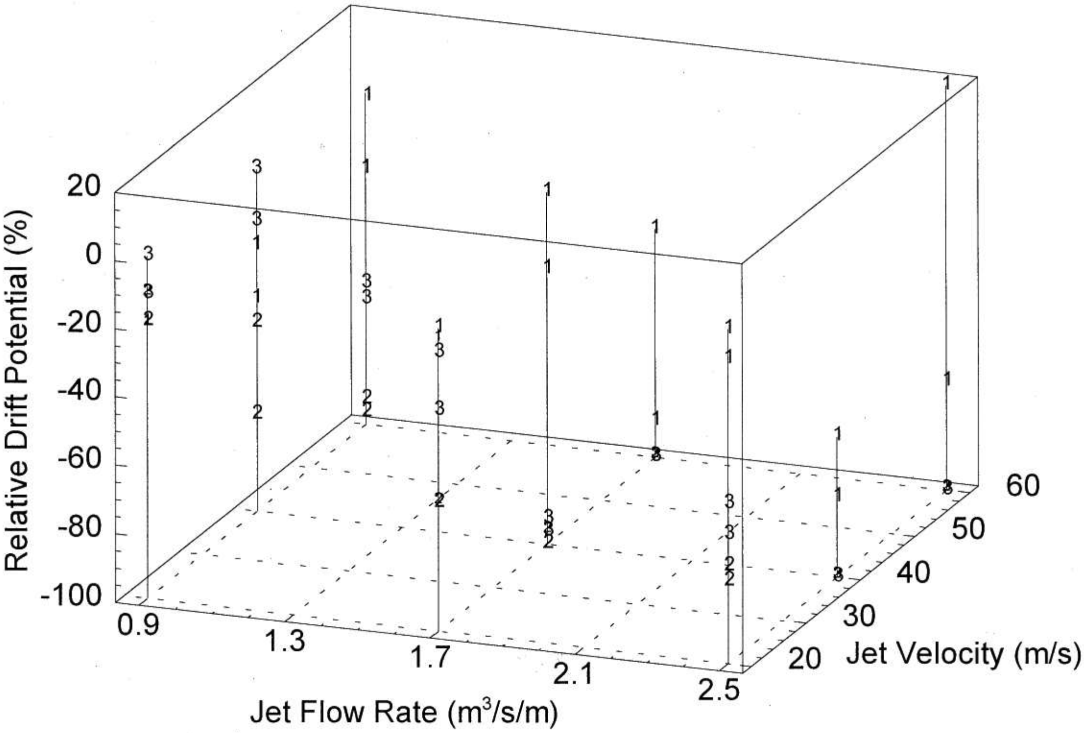

圖 4. 氣流屏蔽噴霧之相對飄移潛勢
Fig. 4. Relative drift potential for pneumatic shielded spraying.

爲了解所有變數對氣流屏蔽飄移減低之影響，統計軟體 Statgraphics (STSC，Inc.) 被使用以進行95%信賴水準之多因子變方分析 (multifactor analysis of variance) ，其結果列於表 1。三個主要因子：氣流速度 (Jet Velocity, JV) 、單位長度氣流流量 (Jet Flow Rate, JFR) 與氣流角度 (Jet Angle, JA) ，以及兩個交感作用，JFR×JA 與 JA×DRA (霧粒釋放角) 在統計分析上是顯著的。圖 5 至圖 7 顯示三個顯著因子基於95%信賴區間相對飄移潛勢之平均值圖，從圖 5 中，基於 Duncan 多重範圍分析 (multiple range analysis) ，氣流速度20 m/s 比另一群氣流速度爲40或60 m/s 者對減低飄移潛勢較無效果。類似地，單位長度氣流流量0.9 $m^3/s/m$ 相較於另一群單位長度氣流流量爲1.7或2.5$m^3/s/m$ 者也較無減低飄移潛勢之效果 (見圖 6) ，然而，每一氣流角度水準對減低飄移之表現卻可被視爲個別之群組，其中氣流角度在15度之水準對減低飄移效果最佳，接著是氣流角度在－10與40度之水準 (見圖 7) ，基於前述之統計分析，爲確保較佳之飄移減低效果並減少氣流屏蔽所需之功率需求，主要變數之最適操作參數顯然爲氣流速度40m/s、單位長度氣流流量1.7$m^3/s/m$ 以及氣流角度15度。此一由多因子變方分析所得之最適操作參數與某些有關氣輔噴霧與氣流剪切噴霧之前人研究結果相當吻合[1,19,22,30]。

表 1. 氣流屏蔽噴霧相對飄移潛勢之變方分析

Table. 1. Analysis of variance of the relative drift potential from pneumatic shielded spraying.

Source of variation	Sum of squares	Degree of freedom	Mean square	F-ratio	Significant level
Main effects					
JV	16,868.797	2	8,434.398	24.622	0.0000
JFR	13,200.220	2	6,600.110	19.267	0.0000
JA	24,220.693	2	12,110.347	35.352	0.0000
DRA	469.310	1	469.310	1.370	0.2517
Interactions					
JV×JFR	3,020.3062	4	755.0765	2.204	0.0943
JV×JA	2,212.9784	4	553.2446	1.615	0.1982
JV×DRA	1,267.4178	2	633.7089	1.850	0.1760
JFR×JA	4,417.4568	4	1,104.3642	3.224	0.0269
JFR×DRA	441.2687	2	220.6344	0.644	0.5328
JA×DRA	2,737.0417	2	1,368.5208	3.995	0.0298
Residual	9,591.6771	28	342.55989		
Total	78,447.166	53			

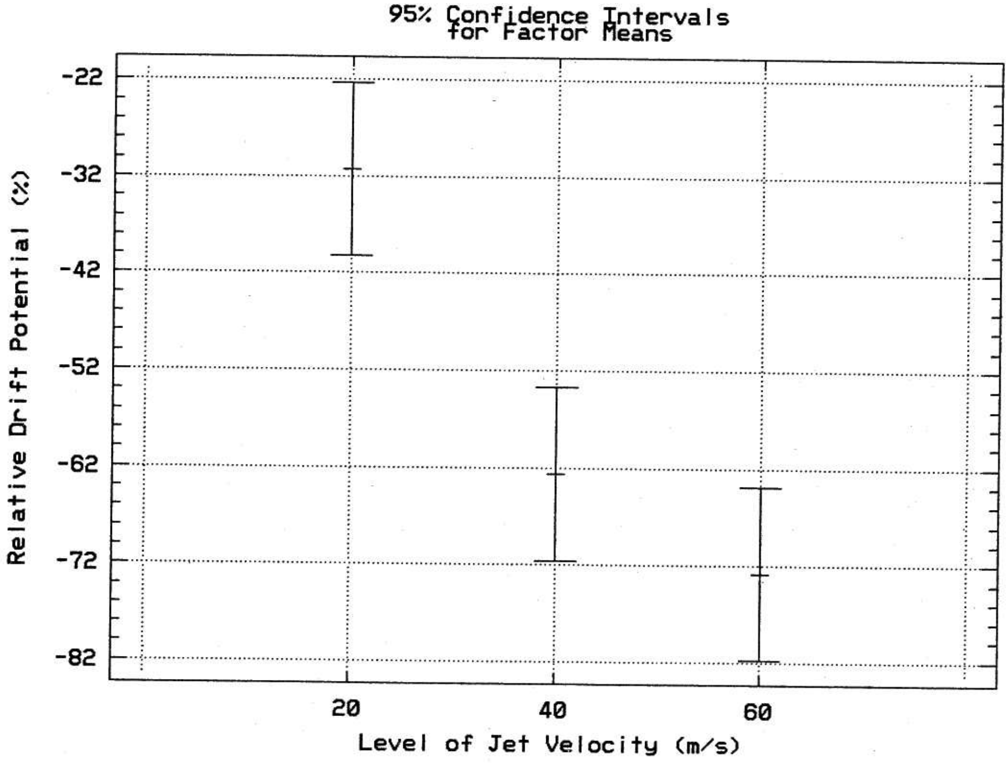

圖 5. 氣流速度三水準之95%信賴區間平均值圖

Fig. 5. Mean plot (95% confidence intervals) for three levels of jet velocity.

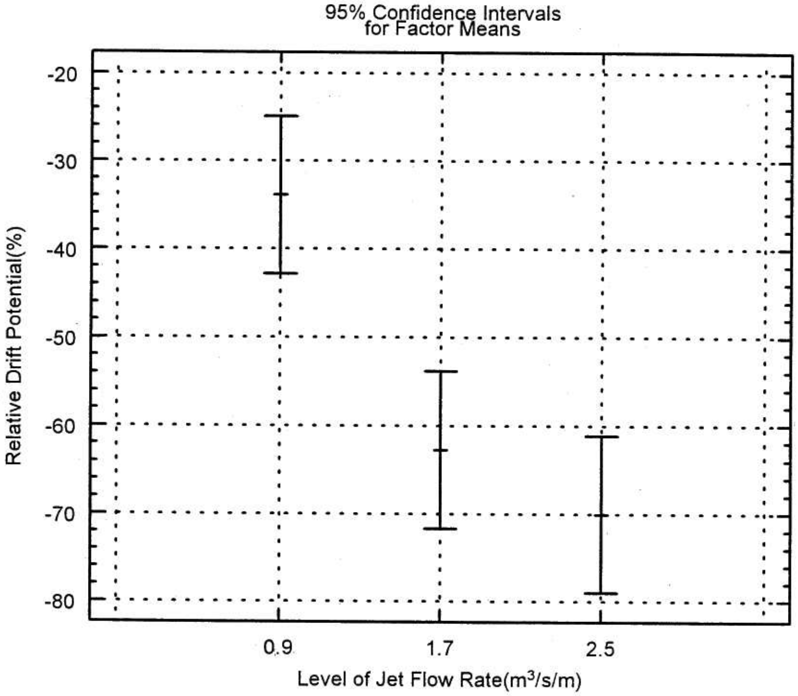

圖 6. 單位長度氣流流量三水準之95%信賴區間平均值圖

Fig. 6. Mean plot (95% confidence intervals) for three levels of jet flow rate.

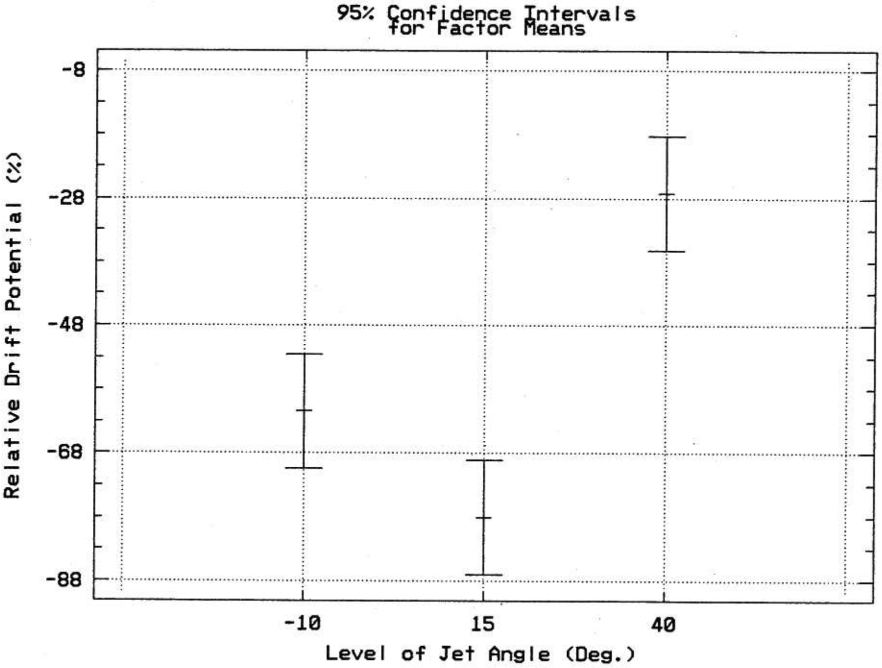

圖 7. 氣流角度三水準之95%信賴區間平均值圖

Fig. 7. Mean plot (95% confidence intervals) for three levels of jet angle.

圖 8 與圖 9 分別顯示具最適操作參數模擬狀況下流場之速度等高線圖與速度向量圖，很明顯地，具15度角之氣流受速度爲 6 m/s 之風影響而改變成幾乎直接向下，其有效地攜帶所有霧粒向下至目標區（見圖10），因此，飄移潛勢被有效地降低。圖 8 中流場之速度等高線圖清楚顯現氣流形成一屏蔽以隔絕風之影響，而氣流屏蔽之形成很自然地於屏蔽之正後方產生一低速度區，其對噴霧飄移之影響有待進一步之研究加以解答。圖10中霧粒軌跡之不同顏色係代表不同之霧粒直徑，深藍色者代表霧粒直徑介於50至94.4μm 間，藍色者代表霧粒直徑介於100至283 μm 間，而綠色、黃色與紅色者分別代表霧粒直徑從289遞增至600 μm。

顯示於圖11中，單位長度氣流流量與氣流角度之交感作用更進一步地肯定主要效果分析之發現，單位長度氣流流量1.7與2.5$m^3/s/m$ 降低飄移潛勢比單位長度氣流流量0.9 $m^3/s/m$ 更多，而隨著每一固定單位長度氣流流量之曲折線，飄移潛勢於氣流角度15度時降至最低，尤其，當氣流角度爲40度時，三單位長度氣流流量水準間相對飄移潛勢並無顯著之差異，此意味著爲善用高單位長度氣流流量，氣流屏蔽之氣流角度必須保持在－10或15度。

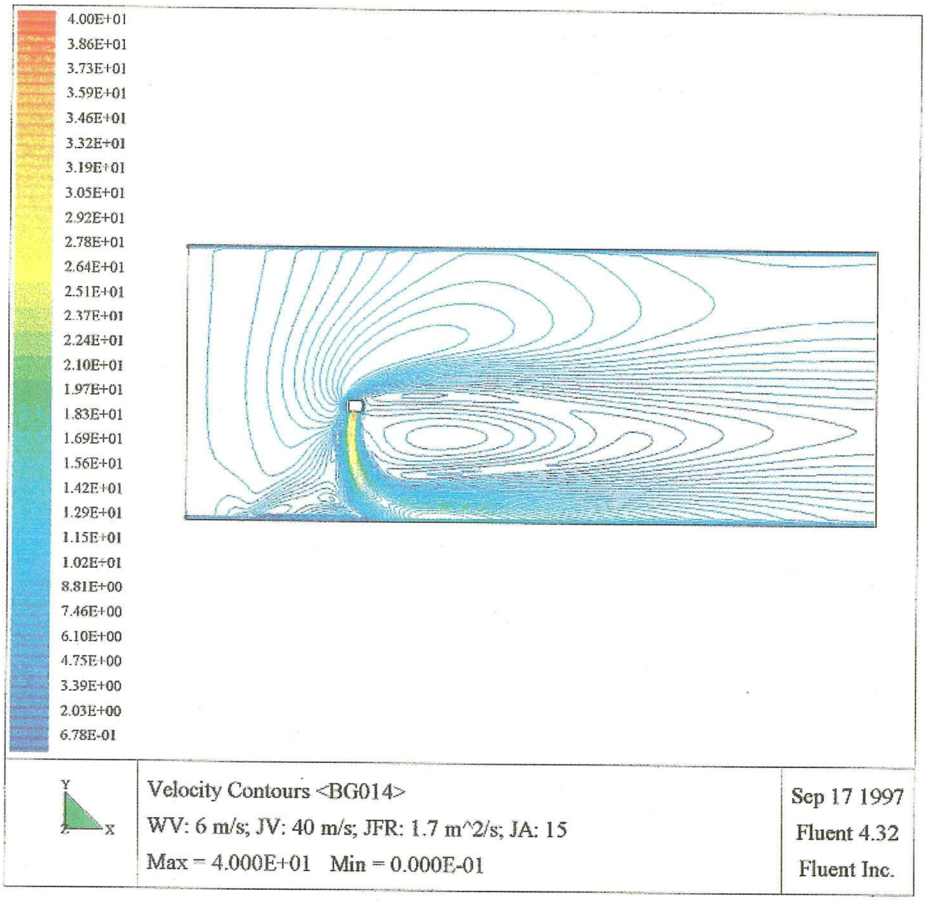

圖 8.　具最佳操作參數氣流屏蔽之流場速度等高線圖

Fig. 8. Velocity contour plot of a pneumatic shield with optimal operating parameters.

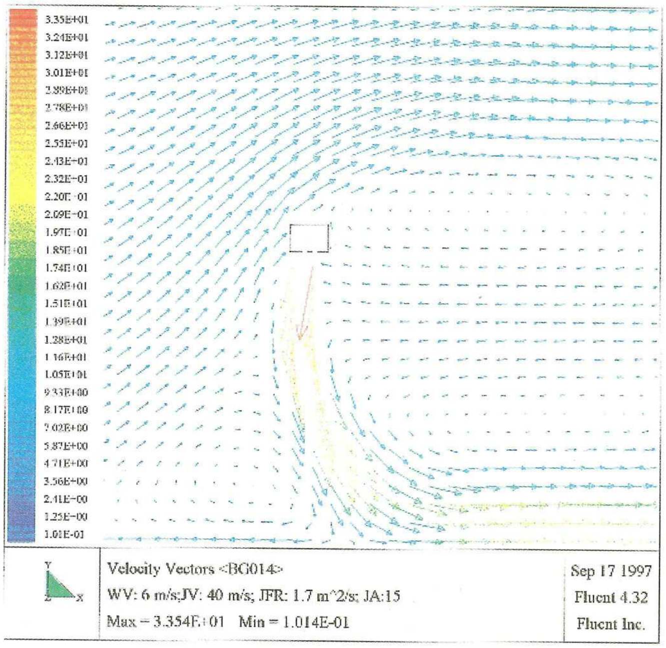

圖 9. 具最佳操作參數氣流屏蔽之流場速度向量圖

Fig. 9. Velocity vector plot of a pneumatic shield with optimal operating parameters.

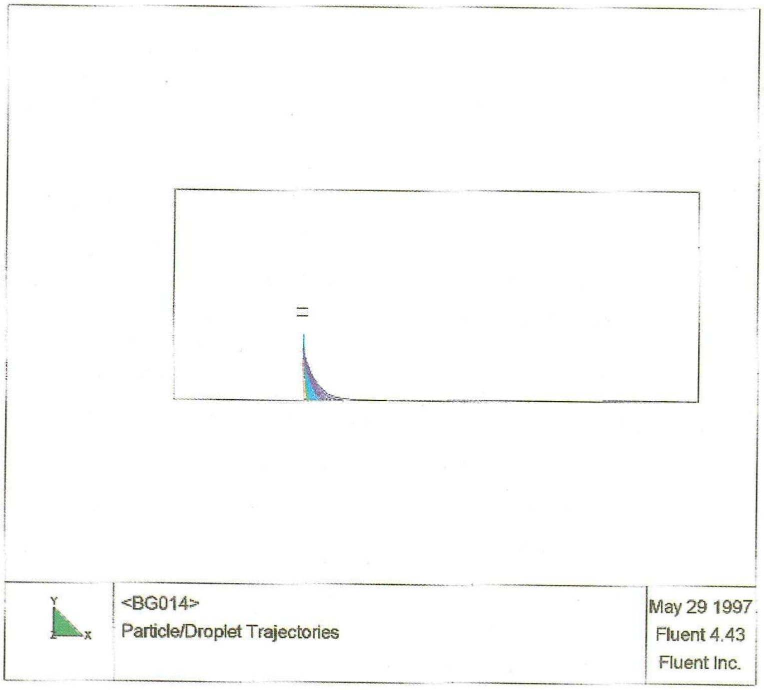

圖 10. 具最佳操作參數氣流屏蔽之霧粒軌跡圖

Fig. 10. Droplet trajectories for the pneumatic shield with optimal operating parameters.

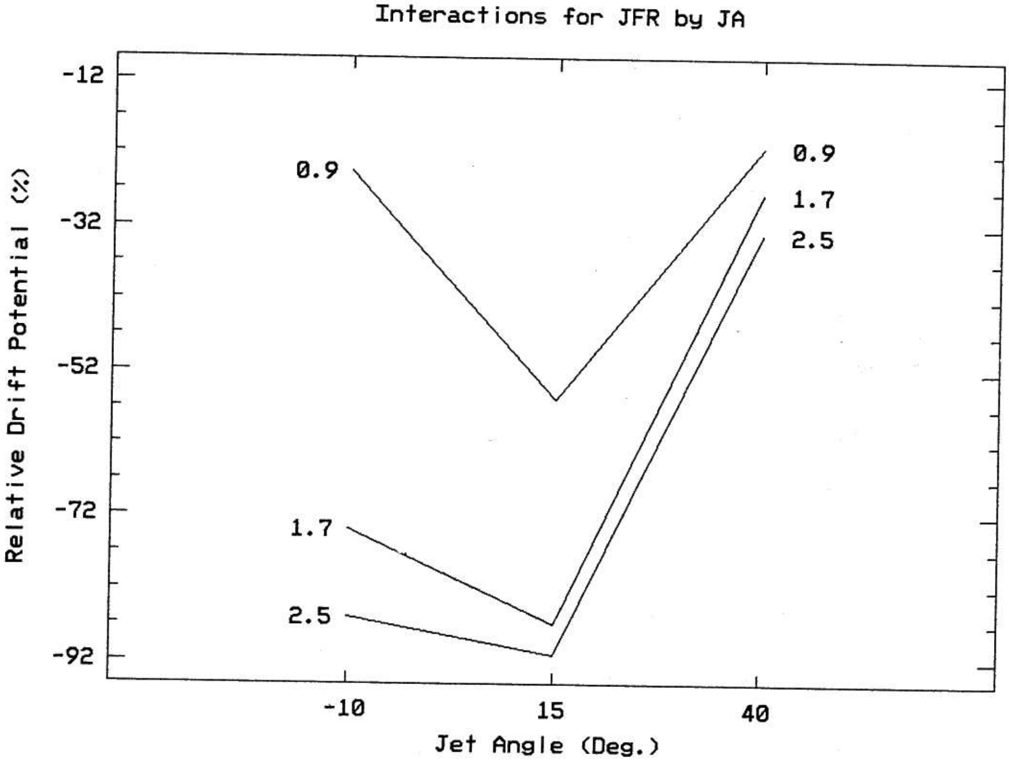

圖 11. 單位長度氣流流量與氣流角度對相對飄移潛勢之交感作用

Fig. 11. Interactions for jet flow rates by jet angles for relative drift potential.

圖12顯示氣流角度與霧粒釋放角度對相對飄移潛勢之交感作用，相對於氣流角度爲40度氣流角度保持在－10或15度時，霧粒釋放角度20度產生較高之相對飄移潛勢，此種情形是可預期的，因爲霧粒釋放角爲20度時，霧粒係逆風而被釋放，然而，當氣流角度爲40度時霧粒釋放角20度比 0 度產生較少之相對飄移潛勢，此可能起因於轉向之氣流，圖13顯示此種情形之速度向量流場，此屏蔽氣流具氣流角度40度、單位長度氣流流量2.5m^3/s/m 以及氣流速度 60 m/s 因受風之影響而一分爲二，圖中沿屏蔽氣流之兩側有清楚之迴漩渦流顯現，當霧粒被以釋放角20度加以釋放時，係跟隨著高速氣流而被帶至地表，僅有小霧粒從地上轉向而逃逸變成飄移（見圖14）。相反地，當霧粒被直接往下釋放時，他們遭遇轉向之氣流，在此情形下，較多霧粒被此轉向之氣流揚起而變成飄移（見圖15）。

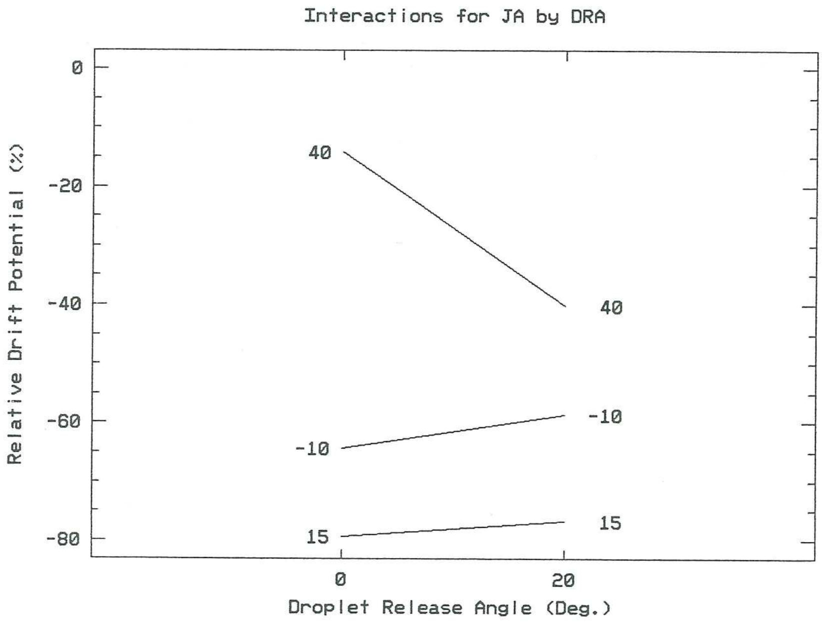

圖 12. 氣流角度與霧粒釋放角對相對飄移潛勢之交感作用
Fig. 12. Interactions for jet angles by droplet release angles for relative drift potential.

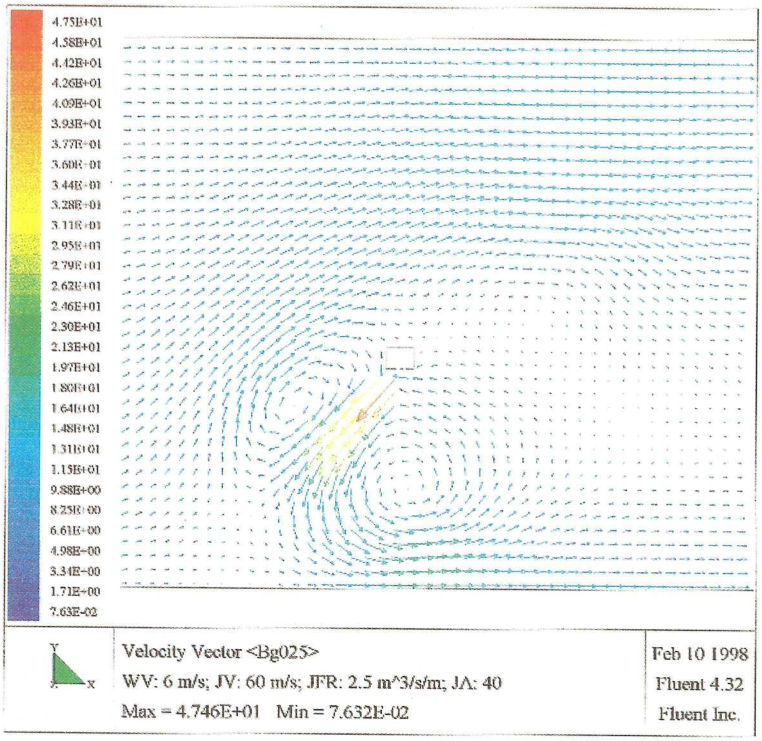

圖 13. 轉向氣流之速度向量流場
Fig. 13. Velocity vector field to show a deflected jet.

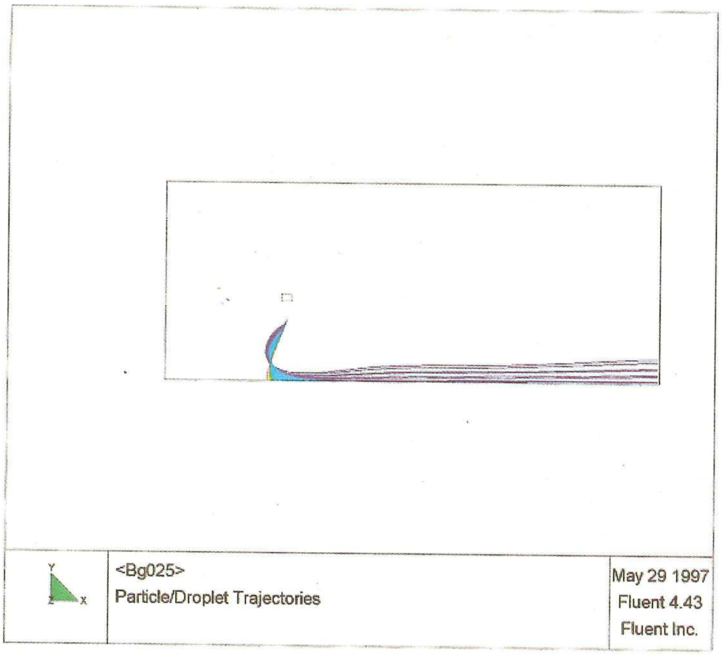

圖 14. 氣流屏蔽噴霧當霧粒往前20度釋放時之霧粒軌跡

Fig. 14. Droplet trajectories of a pneumatic shielded spraying when droplets were released 20 degrees forward.

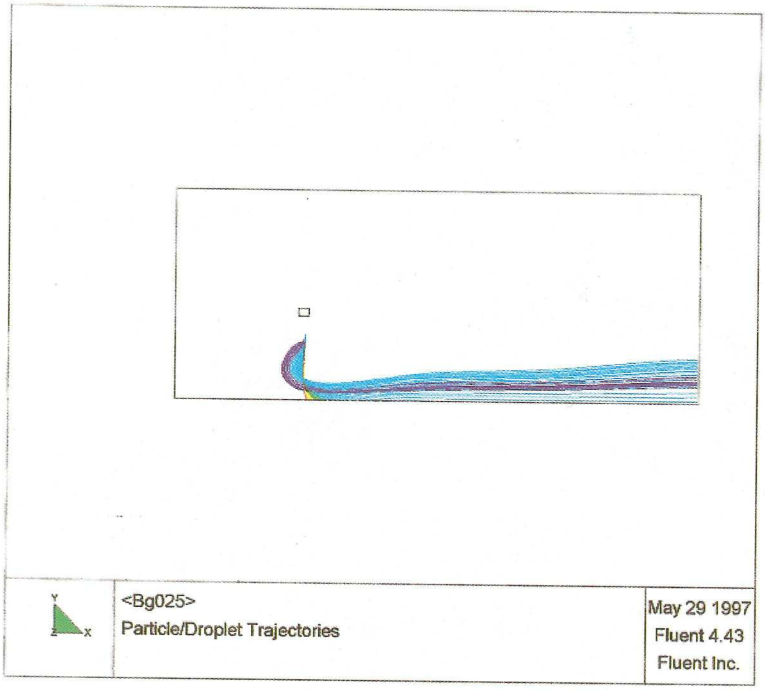

圖 15. 氣流屏蔽噴霧當霧粒直接向下釋放時之霧粒軌跡

Fig. 15. Droplet trajectories of a pneumatic shielded spraying when droplets were released straight down.

二、氣輔噴霧

圖16顯示氣輔噴霧之相對飄移潛勢，很顯然地，所有九個模擬情況都比傳統噴霧有較低之飄移潛勢，其中有兩個情況之飄移減低量小於50%，最壞之情況乃具低氣流速度20 m/s 與低單位長度氣流流量0.9m^3/s/m，在此情形下，飄移潛勢僅被減少4%。圖17顯示氣輔噴霧之範例流場，類似氣流屏蔽噴霧之流場同樣地有一低速度區位於輔助氣流之正後方，唯此低速區之範圍比氣流屏蔽噴霧者略小，其乃所用氣流噴射角度差異所致，圖18顯示對應之霧粒軌跡，儘管輔助氣流本來是直接向下，但卻受風影響而偏移向下風側，此圖也顯示氣輔噴霧之一項特徵，亦即某些小霧粒在被氣幕涵括而隨引前被向上揚起，此一特性 Walklate 氏等人[32]也曾報告過。

像氣流屏蔽噴霧一樣，一併進行氣輔噴霧相對飄移潛勢之多因子變方分析，然而，爲節省篇幅只敘述普通結果如下。氣流速度與單位長度氣流流量兩者顯著地影響相對飄移潛勢，類似氣流屏蔽噴霧，氣流速度20 m/s 比另一群具氣流速度40或60 m/s 者對減低飄移潛勢較無效果，然而，對主要效果單位長度氣流流量而言，只有單位長度氣流流量0.9 m^3/s/m 與2.5 m^3/s/m 彼此顯著差異，而單位長度氣流流量1.7 m^3/s/m 則與其他兩流量間並無顯著差異。

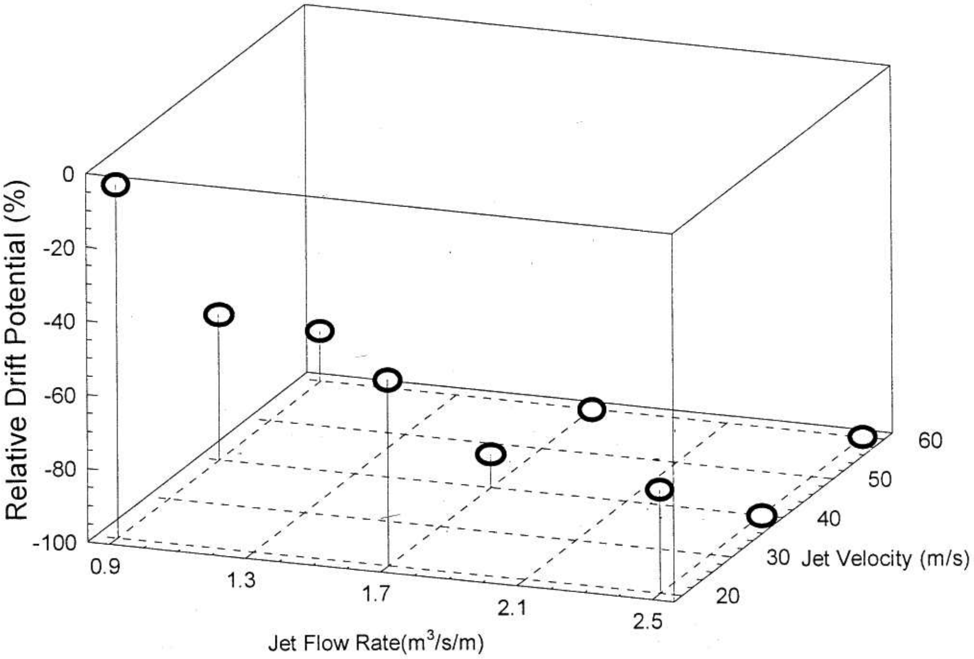

圖 16. 氣輔噴霧之相對飄移潛勢
Fig. 16. Relative drift potential for air-assisted spraying.

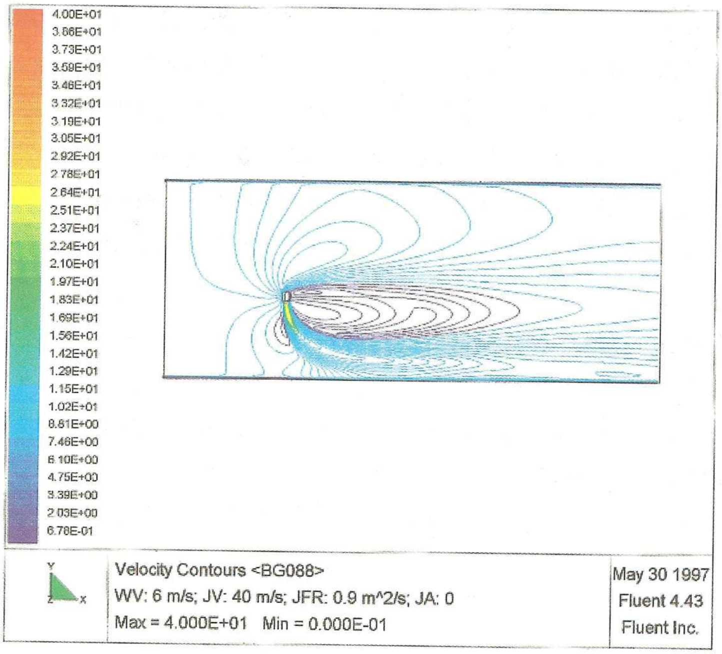

圖 17. 氣輔噴霧之範粒流場
Fig. 17. Flow field of an air-assisted spraying.

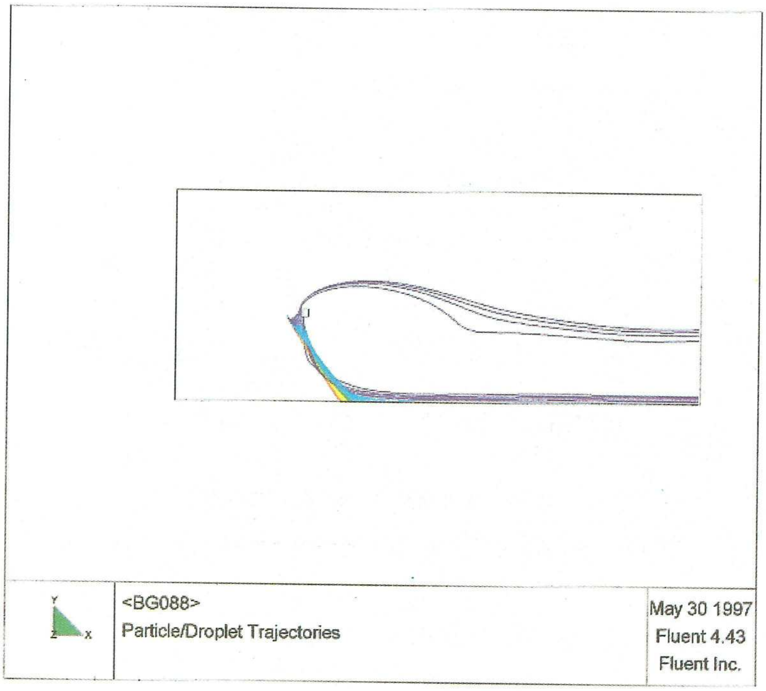

圖 18. 氣輔噴霧之霧粒軌跡
Fig. 18. Droplet trajectories of an air-assisted spraying.

三、擬氣流剪切噴霧 (Pseudo Air-Shear Spraying)

圖19顯示擬氣流剪切噴霧九個模擬情況之相對飄移潛勢，與氣輔噴霧類似，所有九個模擬情況都比傳統噴霧具較低之飄移潛勢，其中七個情況產生高於50%之飄移減低效果。圖20顯示擬氣流剪切噴霧之範例流場，其與氣流屏蔽噴霧之流場相類似，而圖21顯示對應之霧粒軌跡。通常，就擬氣流剪切噴霧而言，向前導引具17度角之氣流與小部份霧粒會因風影響而偏斜，一旦氣流速度與單位長度氣流流量足夠大，此偏斜之氣流會攜帶小霧粒向下至目標區，並阻塞氣流前方之霧粒，然而，當氣流速度與單位長度氣流流量太大時，氣流會因地面阻擋而轉向並向前流通（見圖22），其將減低擬氣流剪切噴霧壓制飄移潛勢之能力。至於相對飄移潛勢之多因子變方分析，由於相對飄移潛勢之平坦反應，並無統計上顯著之變數。

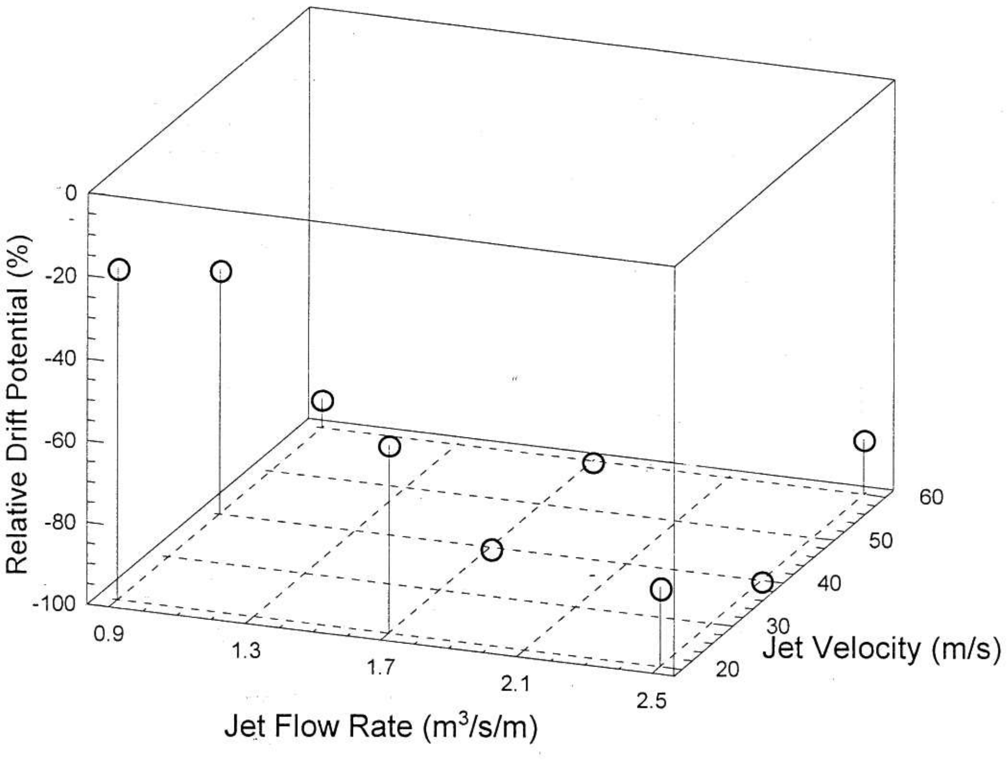

圖 19. 擬氣流剪切噴霧之相對飄移潛勢

Fig. 19. Relative drift potential for pseudo air-shear spraying.

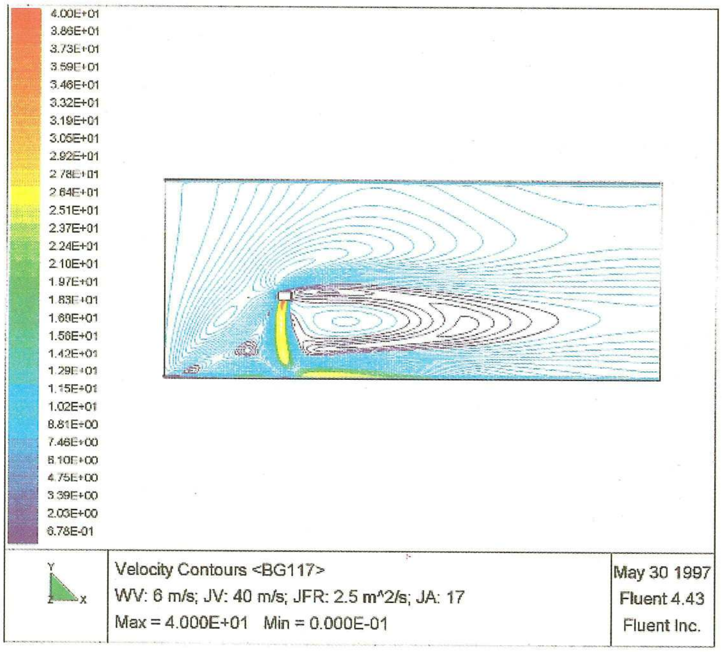

圖 20. 擬氣流剪切噴霧之範例流場
Fig. 20. Flow field of a pseudo air-shear spraying.

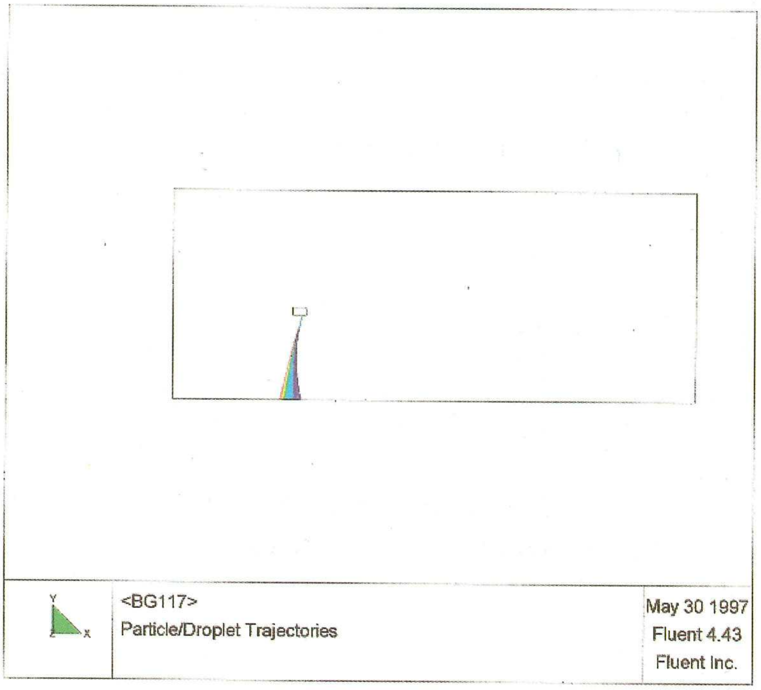

圖 21. 擬氣流剪切噴霧之霧粒軌跡
Fig. 21. Droplet trajectiories for pseudo air-shear spraying.

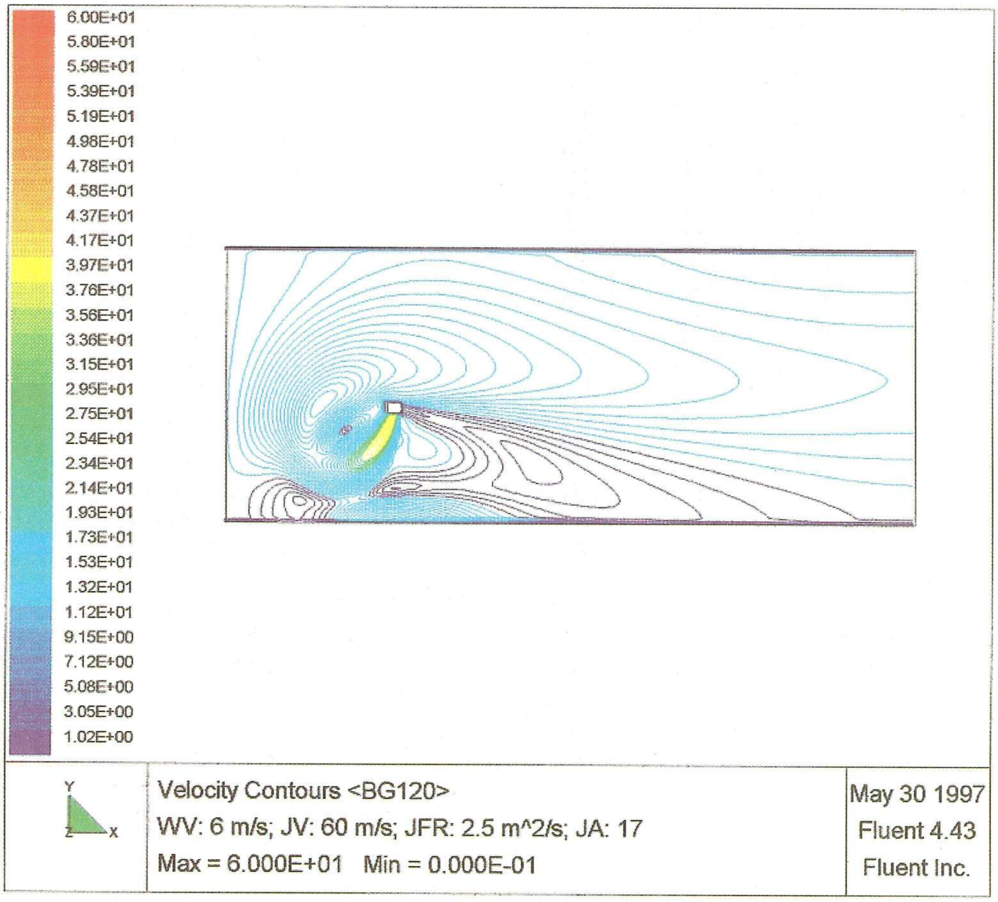

圖 22. 擬氣流剪切噴霧之流場以顯示轉向氣流

Fig. 22. Flow field of a pseudo air-shear spraying to show a deflected air jet.

四、三種噴霧系統之比較

圖23顯示三種噴霧系統基於相對飄移潛勢之比較，其中 PSS、AAS 與 PASS 分別代表氣流屏蔽噴霧（Pneumatic Shielded Spraying）、氣輔噴霧（Air-Assisted Spraying）與擬氣流剪切噴霧（Pseudo Air-Shear Spraying）；為確定此比較係基於各噴霧方法之最佳性能，最適氣流速度與單位長度氣流流量（40與60m/s，以及1.7與2.5m^3/s/m）係根據前面之分析而選擇，氣流組合中「V40＋FR1.7」係代表氣流速度為40m/s，而單位長度氣流流量為1.7m^3/s/m，餘皆類同。就氣流屏蔽噴霧而言，此比較之代表係具15度之氣流角度。如圖23所示，三種噴霧方法表現得一樣好，就這些氣流組合而言，氣流屏蔽噴霧僅於氣流速度40m/s 與單位長度氣流流量1.7m^3/s/m 之組合時比擬氣流剪切噴霧差；然而，在氣流速度60m/s 與單位長度氣流流量2.5m^3/s/m 之組合時，擬氣流剪切噴霧卻由於前述過量之氣流速度與單位長度氣流流量而比氣流屏蔽噴霧差。因此，具氣流速度大於40m/s、單位長度氣流流量大於1.7m^3/s/m，以及氣流角度為15度之氣流屏蔽噴霧頗有希望成為減低噴霧飄移之另類技術。

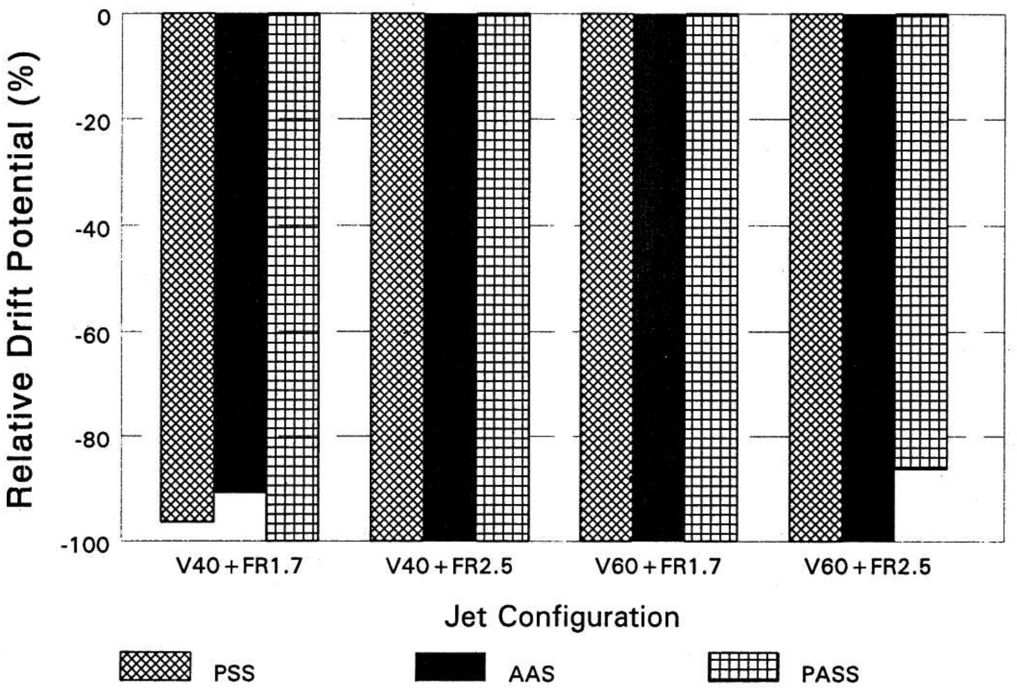

圖 23. 三種噴霧方法之相對飄移潛勢
Fig. 23. Relative drift potential for three spraying methods.

結　論

一、並非所有氣流屏蔽之模擬情形皆可提供良好之飄移控制，爲確保較佳之飄移減低效果並減少氣流屏蔽所需之功率需求，主要變數之最適操作參數經多因子變方分析選定爲氣流速度40m/s、單位長度氣流流量1.7m^3/s/m 以及氣流角度15度，此一最適操作參數與某些有關氣輔噴霧與氣流剪切噴霧之前人研究結果相當吻合。

二、除了氣輔噴霧與擬氣流剪切噴霧外，具氣流速度大於40m/s、單位長度氣流流量大於1.7m^3/s/m，以及氣流角度爲15度之氣流屏蔽噴霧頗有希望成爲減低噴霧飄移之另類技術。

三、儘管氣流屏蔽在控制噴霧飄移上顯現著實可期之潛勢，未來需朝設計氣流屏蔽之實體元件、進行田間試驗以確定飄移減低效果與沉積均勻度，以及氣流屏蔽使用之成本分析等作更進一步之研究。

誌　謝

本研究蒙美國俄亥俄州州立大學農業試驗與發展中心（OARDC/OSU）及美國農部農業研究服務農藥施用技術研究單位（USDA-ARS Application Technology Research Unit） 提供模擬所需之軟硬體，始得以完成，特此誌謝。

引用文獻

1. Brown, R. B. 1995. General principles of air-assisted sprayers. Proceedings of National Conference on Pesticide Application Technology, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada. pp.97—102.
2. Campbell, J. M. and D. C. Thill. 1995. Herbicide rate, drift and coverage with an air shear sprayer. Proceedings of National Conference on Pesticide Application Technology, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada. pp.180—189.
3. Cooke, B. K., E. C. Hislop, P. J. Herrington, N. M. Western and F. Humpherson-Jones. 1990. Air-assisted spraying of arable crops, in relation to deposition, drift and pesticide performance. Crop Protection 9 : 303—311.
4. Derksen, R. C. 1994. Air-assisted sprayer evaluations for potato pest control. ASAE Paper No. 94—1506, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
5. Edwards, C. J. and W. E. Ripper. 1953. Droplet size, rates of application and the avoidance of spray drift. Proceedings of British Weed Control Conference pp.348—367.
6. Fehringer, R. J. and R. A. Cavaletto. 1990. Spray drift reduction with shrouded boom sprayers. ASAE Paper No. 90—1008, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
7. FLUENT Incorporated. 1995. FLUENT user's guide. Version 4.3 Fluent Incorporated, Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766.
8. French, H., P. Alexander and B. Young. 1993. Adoption by farmers of shielded boom technology to reduce chemical drift from boom sprays. Department of Agriculture, Victoria, Food Research Institute, Sneydes Rd., Werribee VIC 3030, Australia.
9. Gohlich, H. 1985. Deposition and penetration of sprays. BCPC MONO No. 28 Symposium on Application and Biology pp.173—182.
10. Grinstein, A., H. Frankel, M. Austerweil and G. Kritzman. 1988. Air-assisted placement spraying for Stemphylium control in seed onions. Crop Protection 7 : 356—360.
11. Hislop, E. C. 1991. Air-assisted crop spraying: an introductory review. BCPC MONO No. 46 Air-assisted spraying in crop protection. pp.3—14.
12. Hislop, E. C., N. M. Western, B. K. Cooke and R. Bulter. 1993. Experimental air-assisted spraying of young cereal plants under controlled conditions. Crop Protection 12 : 193—200.
13. Hobson, P. A., P. C. H. Miller, P. J. Walklate, C. R. Tuck. 1993. Spray drift from hydraulic spray nozzles: the use of a computer simulation model to examine factors influencing drift. Journal of Agricultural Engineering Research 54(2) : 293—305.
14. Howard, K. D. 1993. Use of mechanical shields for increased deposition. ASAE Paper No. 93—1545, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
15. Howard, K. D., J. E. Mulrooney and L. D. Gaultney, 1994. Penetration and deposition of air-assisted sprayers. ASAE Paper No.94—1024, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
16. Howard, K. D. and J. E. Mulrooney. 1995. Testing protocol for the evaluation of air-assisted boom sprayers. ASAE Paper No. AETC 96—116, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
17. Lee, G. D. and J. A. Schwalb. 1989. Fuel spray evolution: comparison of experiment and CFD simulation of nonevaporating spray. ASME Paper. No. 88-GT-27 SRN-507, ASME, New York, N. Y. 10017.
18. Manor, G., A. Hofner, R. Or, G. Phishler, Y. Epstein, J. Nakash and M. Jacobi. 1989. Air stream facilitated application of cotton foliage treatments. Transactions of the ASAE 32(1) : 37—40.
19. May, M. J. 1991. Early studies on spray drift, deposit manipulation and weed control in sugar beet with two air-assisted boom sprayers. BCPC MONO No. 46 Air-assisted spraying in crop protection. pp.89—96.

20. Maybank, J., S. R. Shewchuk and K. Wallace. 1991. The use of shielded nozzles to reduce off-target herbicide spray drift. Canadian Agricultural Engineering 32 : 235—241.

21. Ozkan, H. E., A. Miralles, H. Zhu, D. R. Reichard and R. D. Fox. 1996. Shields to reduce spray drift. ASAE Paper No. 96—1077, ASAE, St. Joseph, MI 49085.

22. Panneton, B., H. Philion and R. Theriault. 1996. Spray chamber evaluation of air assisted spraying. ASAE Paper No. 96—1078, ASAE, St. Joseph, MI 49085.

23. Pompe, J. C. A. M. and H. J. Holterman. 1992. Technical aspects of pesticide application. Wageningen Agricultural University, Agrotechnion Bomenweg 4 6703 HD, Wageningen, The Netherlands.

24. Reichard, D. L., H. Zhu, R. D. Fox and R. D. Brazee. 1992a. Wind tunnel evaluation of a computer program to model spray drift. Transactions of the ASAE 35(3) : 755—758.

25. Reichard, D. L., H. Zhu, R. D. Fox and R. D. Brazee. 1992b. Computer simulation of variables that influence spray drift. Transactions of the ASAE 35(5) : 1401—1407.

26. Quanquin, B. J. 1992. Less drift, more on target with the twin system. ASAE Paper No. 92—1564, ASAE, St. Joseph, MI 49085.

27. Quanquin. B. J. 1995. Air-assist applied to field sprayers. Proceedings of National Conference on Pesticide Application Technology, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada. pp.124—126.

28. Rogers, R. B. and R. J. Ford. 1984. The windproof sprayer. ASAE Paper No. 84—1656, ASAE, St. Joseph, MI 49085.

29. Smith, D. B., F. D. Harris and B. J. Butler. 1982. Shielded sprayer boom to reduce drift. Transactions of the ASAE 25(5) : 1136—1140, 1147.

30. Taylor, W. A. and P. G. Andersen. 1989. The use of air-assistance in field crop sprayer to reduce drift and modify drop trajectories. Proceedings of Brighton Crop Protection Conference-Weeds 2, 631—639.

31. Van, N. Q. and R. H. Howell. 1976. Influence of initial turbulence intensity on the development of plane air-curtain jets. Transactions of ASHRAE 82(1) : 208—228.

32. Walklate, P. J., K. L. Weiner and C. S. Parkin. 1993. Computational fluid dynamics: a tool for evaluating air assistance sprayer design concepts. ANPP-BCPC-Second International Symposium on Pesticides Application Techniques pp.101—108.

33. Watson, D. G. and R. L. Wolff. 1985. Air carrier technique for row crop spraying application. Transactions of the ASAE 28(5) : 1445—1448.

34. Weiner, K. L. and C. S. Parkin. 1993. The use of computational fluid dynamic code for modeling spray from a mistblower. Journal of Agricultural Engineering Research 55 : 313—324.

35. Womac, A. R., J. E. Mulrooney and W. P. Scott. 1992. Characteristics of air-assisted and drop-nozzle sprays in cotton. Transactions of the ASAE 35(5) : 1369—1376.

36. Young, B. W. 1990. Droplet dynamics in hydraulic nozzle spray clouds. Formulations and Application Systems: 10th Volume, ASTM STP1078, Edited by Bode, L. E., Hazen, J. L. and Chasin, D. G. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, US. pp.142—155.

37. Young, B. W. 1991. A method for assessing the drift potential of hydraulic nozzle spray clouds, and the effect of air assistance. BCPC MONO No. 46 Air-assisted spraying in crop protection. pp.77—86.

38. Zhu, H., D. L. Reichard, R. D. Fox, R. D. Brazee and H. E. Ozakan. 1994. Simulation of drift of discrete sizes of water droplets from field sprayers. Transactions of the ASAE 37(5) : 1401—1407.

Design Evaluation of Pneumatic Shielded Spraying System[1]

Jyh-Rong Tsay[2] and H. Erdal Ozkan[3]

Summary

Spray drift is a major concern for users of pesticides as well as people who live in areas where pesticides are sprayed. Using spray shields has been among the strategies recommended for reducing spray drift. Even though many studies pertaining to mechanical shields had shown positive effect on reducing spray drift, little information about the use of pneumatic shields was available. In this study, the design evaluation of pneumatic shielded spraying system based on comparing effects on drift reduction was conducted by using a computational fluid dynamic software, FLUENT. For purpose of relative comparisons, conventional spraying using nozzles, air-assisted spraying and air-shear spraying were also included. Main conclusions drawn from this study were as follows. Not all simulated cases of pneumatic shielded spraying provided better drift control. To ensure a better drift reduction and reduce the power required for pneumatic shielded spraying, the optimal operating parameters for the dominant variables appeared to be jet velocity of 40 m/s, jet flow rate of 1.7 $m^3/s/m$, and jet angle of 15 degrees. The optimal operating parameters obtained from a multifactor analysis of variance conforms with some previous studies about air-assisted spraying and air-shear spraying. Except air-assisted spraying and pseudo air-shear spraying, pneumatic shielded spraying with jet velocity larger than 40m/s, jet flow rate larger than $1.7m^3/s/m$ and jet angle of 15 degrees might be a promising alternative to reduce spray drift.

Key words : Pneumatic shielded, Spraying system, Design evaluation, CFD, FLUENT.

---

1. Contribution No. 1931 from Taiwan Agricultural Research Institute.
2. Associate Researcher, Department of Agricultural Engineering, TARI, Wufeng, Taichung, Taiwan, ROC.
3. Professor, Department of Food, Agricultural and Biological Engineering, Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA.